

УДК 621.039.512

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ДВУХСЕКЦИОННЫХ БЛАНКЕТОВ КАСКАДНОГО ТИПА

*Завьялов Н.В., Колесов В.Ф., Кувшинов М.И., Фомушкин Э.Ф., Хоружий В.Х.,
Житник А.К., Илькаев Р.И., Пунин В.Т., Иванов И.А., Нефедов Ю.Я.,
Гаврилов В.В., Егоров В.П., Новоселов Г.Ф., Панин А.В., Пешехонов Д.П.,
Тельнов А.В., Хохлов Ю.А. (РФЯЦ — ВНИИЭФ), Ребю П. (КАЭ Франции)*

Двухсекционные ядерные реакторы с односторонней нейтронной связью секций (реакторы каскадного типа) известны с 50-х годов прошлого столетия. Значительный интерес к этим устройствам, наблюдаемый с 80-х годов, вызван представляемыми ими возможностями существенного сокращения длительности импульсов излучения в реакторах и бустерах и снижения мощности ускорителей протонов в электроядерных установках [1—4].

В качестве показателя эффективности принципа каскадности применительно к бланкетам электроядерных установок принимается коэффициент каскадного усиления A , который равен отношению числа делений в каскадном ($P = P_1 + P_2$; P_1, P_2 — число делений в 1-й и 2-й секциях) и обычном бланкете (P_0), нормированных на один нейтрон первичного источника, при условии равенства $k_{эф}$ того и другого бланкета:

$$A = P/P_0. \quad (1)$$

К настоящему времени выполнено большое число работ этого направления. Серьезное внимание к каскадным реакторам проявлено во ВНИИЭФ, ФЭИ, ИТЭФ, РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИТФ, ОИЯИ (Россия), Аргоннской, Лос-Аламосской и Сандиевской национальных лабораториях (США), Ереванском университете (Армения) [1—12].

Существенно, однако, отметить, что большинство работ о каскадных системах относится к расчетно-теоретическим или проектным. Имеется несколько систем, которые можно отнести к разряду каскадных. Такими системами являются сборка [12] Аргоннской национальной лаборатории, стенды УКС-1М и «Б» ФЭИ [13, 14]. Но экспериментов, ориентированных на изучение свойств собственно каскадных реакторов, на их сравнение со свойствами аналогичных односекционных систем до настоящего времени не проводили.

Эксперименты, запланированные в РФЯЦ — ВНИИЭФ [15, 16], будут направлены прежде всего на подтверждение действенности использования ^{237}Np в качестве средства обеспечения односторонней связи секций и проверку преимуществ каскадного бланкета в части понижения требований к мощности ускорителя.

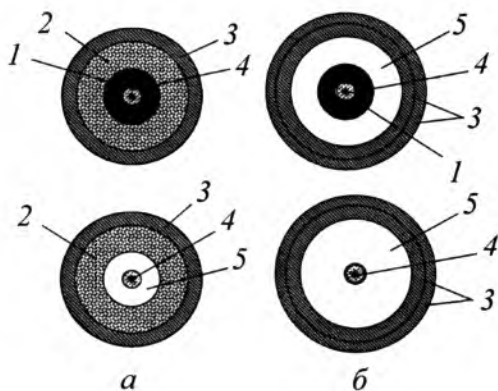
Первая серия таких экспериментов завершена в конце 2002 г. Описание их результатов и является темой настоящей статьи.

Экспериментальные модели. При планировании экспериментов особый интерес был проявлен к сборкам с низким равным $\sim 0,6$ $k_{эф}$. Такие сборки предельно просты по конструкции и компактны, содержат сравнительно небольшое количество делящихся веществ и заведомо без принятия специальных мер защиты удовлетворяют требованиям ядерной безопасности. Расчеты ядерно-физических характеристик сборок с низкими значениями $k_{эф}$ подтвердили их приемлемость в качестве

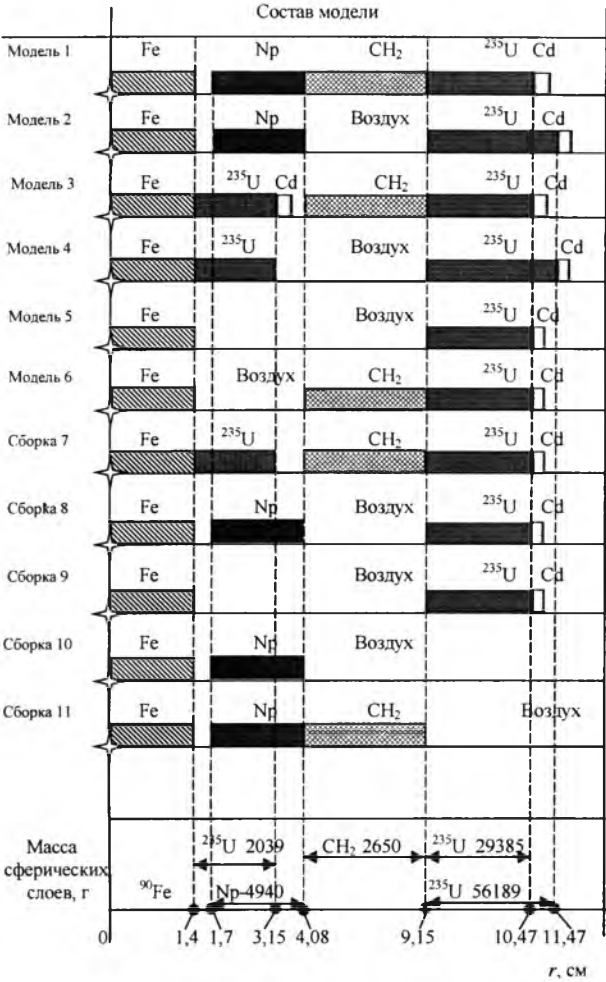
моделей для намеченных экспериментов [17]. Было показано, что отличие эффективности моделей обычных и каскадных бланкетов в этом случае невелико, но тем не менее достаточно, чтобы быть зафиксированным в эксперименте. Измерения и обработка первичных результатов экспериментов сопровождалась всесторонней расчетно-теоретической поддержкой с использованием новой версии программ ВНИИЭФ для решения методом Монте-Карло уравнений переноса нейтронов и γ -квантов [18]. Уже при подготовке экспериментов был проведен большой цикл расчетных исследований вариантов модельных сборок, учитывающий возможность их реализации путем использования имеющихся во ВНИИЭФ деталей (или заготовок) из нептуния и обогащенного урана.

С помощью расчетов подбирали размеры сборок, приблизительно соответствующие заданному полному коэффициенту размножения нейтронов ($k_{эф}$) и удовлетворяющие условию близости коэффициентов размножения нейтронов во внутренней ($k_{эф1}$) и внешней секции ($k_{эф2}$). На каждом этапе подбора конфигурации конкретной сборки рассчитывали $k_{эф}$, $k_{эф1}$ и $k_{эф2}$. Для окончательно подобранной сборки, кроме этих величин, рассчитывали также число первичных делений S_1 , S_2 и полное число делений P_1 , P_2 во внутренней и внешней секциях [19]. На основании расчетов в качестве лабораторных моделей для проведения экспериментов были выбраны сферические сборки из металлического ^{237}Np и урана 90%-ного обогащения по ^{235}U . Нептуний размещали в центре сборок, уран — на периферии. Пространство между нептунием и ураном заполняли полиэтиленом или оставляли пустым. В центре сборок помещали точечный источник нейтронов с делительным спектром (рис. 1). В качестве источника нейтронов использовали ^{252}Cf .

В целях сравнения эффективности коэффициента A в каскадных бланкетах с различными способами обеспечения односторонности связи секций была изучена также модель, в которой между первой и второй секциями из урана располагали слои из кадмия толщиной 1 мм и полиэтилена. Слой кадмия прилегал к наружной поверхности первой секции. Всего в экспериментах было изучено 11 размножающих нейтроны сборок. Состав и размеры этих сборок в немного идеализированном виде представлены на рис. 2. Реально сферические слои состоят из полусфер. Каждая урановая полусфера имеет медно-никелевое покрытие общей толщиной ~50 мкм. Полусферы из нептуния заварены в герметичные чехлы из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм. Между полусферами из нептуния по экватору размещали алюминиевую камеру с трековыми детекторами. В одной нептуниевой и во всех урановых полусферах имелись полюсные



Р и с. 1. Схематическое изображение каскадных моделей бланкета, содержащих ^{237}Np , и соответствующих односекционных моделей: а — модели со слоем замедлителя; б — модели без замедлителя; 1 — ^{237}Np ; 2 — полиэтилен; 3 — высокообогащенный уран; 4 — источник нейтронов ^{252}Cf ; 5 — воздух



Р и с. 2. Схематическое изображение экспериментально изученных сферических модельныхборок

Методика измерения коэффициента умножения нейтронов центрального источника характеризуется высокой точностью. Хотя эти измерения и не приносят данных для непосредственного определения коэффициентов каскадного усиления, они тем не менее информативны в аспекте проверки используемых в расчетах математических программ и нейтронных констант.

Основными, как уже отмечалось, были измерения распределения числа делений. Результаты этих измерений использованы в целях определения полного числа делений в каскадных (*P*) и односекционных модельных сборках (*P*₀), а также коэффициентов каскадного усиления *A*. Все измеренные величины нормировали на один нейтрон ²⁵²Cf-источника, размещенного в центре модельной сборки.

Для регистрации актов деления ядер ²³⁷Np и ²³⁵U в соответствующих узлахборок использовали диэлектрические трековые детекторы осколков деления [20]. В этих целях применяли полимерную пленку из поликарбоната толщиной 0,1 мм. Поскольку детали из ²³⁷Np заключены в непрозрачные для осколков деления чехлы, для выполнения эксперимента были изготовлены слои из ²³⁷Np и специальная камера-контейнер для размещения нептуниевых слоев и образцов поликарбонатной

отверстия диаметром 12 и 27 мм соответственно. Для обеспечения угловой изотропности вылетающих из источника нейтронов ампулу с ²⁵²Cf размещали в шаре из чистого железа диаметром 28 мм. Отметим, что расчеты проводили с учетом реальной конструкции и состава деталей в моделях.

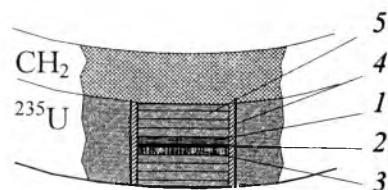
Методики измерений и расчетов. Эксперименты проводили на стенде ВНИИЭФ для критическихборок (стенд ФКБН-2М) [19]. Сборки в виде шаров, составленных из полусферических деталей, монтировали на штатной подставке, установленной на столе стенда. В опытах измеряли распределение числа делений по радиусу слоев из нептуния и урана в первых шести сборках, представленных на рис. 2. Этим основным измерениям предшествовали вспомогательные измерения коэффициентов умножения нейтронов центрального источника во всех 11 сборках.

пленки. Камеру устанавливали между верхней и нижней частью нептуниевой сборки. При конструировании камеры особое внимание обращали на минимизацию толщины устройства. В камере можно установить шесть слоев. Нептуний наносили электролитическим методом на алюминиевые подложки толщиной 0,2 мм и диаметром 24 мм. Диаметр нептуниевых слоев 20 мм.

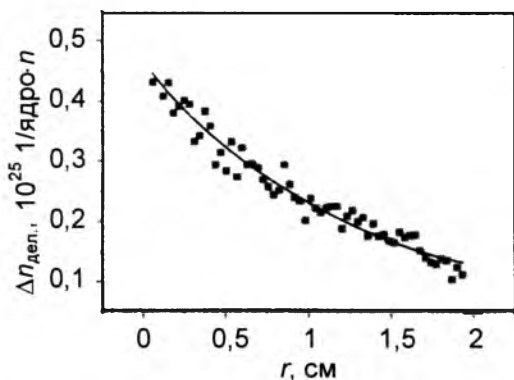
При измерении распределения числа делений в урановых слоях сборки применяли другую систему размещения образцов. Полюсные каналы урановых сфер заполняли дисками диаметром 20 мм, толщиной 0,5 и 1 мм и втулками из ^{235}U . Эти небольшие детали не были покрыты защитным антикоррозионным слоем. Образцы детектирующей пленки диаметром 20 мм и толщиной 0,1 мм устанавливали между урановыми дисками. Схема расположения урановых дисков, детектирующих и экранирующих образцов пленки представлена на рис. 3.

В качестве источника первичных нейтронов в измерениях на каскадных и односекционных сборках использовали метрологически аттестованный источник ^{252}Cf . Облучение одной конкретной сборки продолжалось от нескольких минут до 5 ч. При оптимальном выборе времени облучения в диэлектрическом детекторе фиксировалось $\sim 10\,000$ треков. Этого количества достаточно для получения необходимой статистической точности. Взвешивание образцов для всех использовавшихся слоев ^{237}Np и урановых дисков проводили на БИР-2М. Нейтронный спектр в центральном канале реактора БИР-2М метрологически аттестован [21]. Измеренное распределение плотности делений в нептуниевых и урановых узлах некоторых моделей приведено на рис. 4—7.

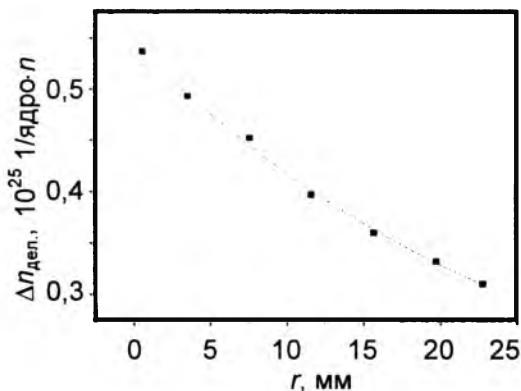
Вообще говоря, используя представленные на рис. 4—7 зависимости, путем их интегрирования по объему делящегося вещества можно определить полное число делений P_1 , P_2 , P_0 в каждой секции модели бланкета и вычислить коэффициент каскадного усиления по отношению (1). Однако такой путь решения задачи мог бы



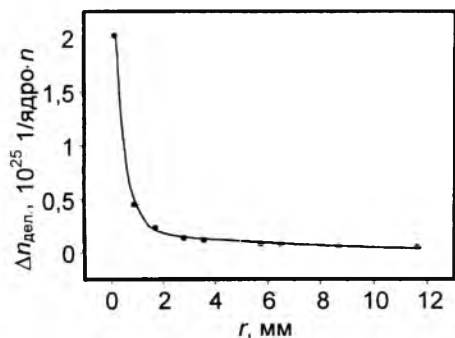
Р и с. 3. Схематическое изображение устройства для размещения трековых детекторов по радиусу второй секции моделей бланкета: 1 — диск из ^{235}U , примыкающий к детектору; 2 — трековый детектор (пленка из поликарбоната); 3 — поглощающий осколки деления экран из поликарбоната; 4, 5 — втулка и диск заполнителя из ^{235}U соответственно



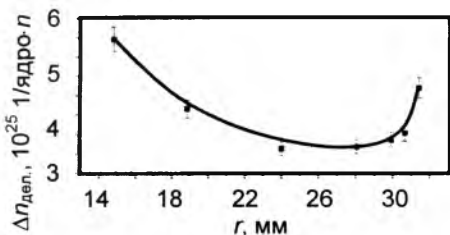
Р и с. 4. Распределение плотности делений по радиусу нептуниевых слоев модельной сборки 2



Р и с. 5. Распределение плотности делений по радиусу внешнего уранового слоя модельной сборки 2, не содержащей слоев из CH_2



Р и с. 6. Распределение плотности делений по радиусу внешнего уранового слоя, прилегающего к слою CH_2 , модельной сборки 1



Р и с. 7. Распределение плотности делений по радиусу внутреннего уранового слоя, прилегающего к слою $\text{Cd} + \text{CH}_2$, модельной сборки 3

этих деталей. Параллельно с числом делений в детекторах рассчитывали также полное число делений в секциях сборок и $k_{\text{эф}}$ сборок. По отношениям расчетных и экспериментальных взвешенных сумм чисел делений в трековых детекторах (в качестве весовых множителей a_i использовали объем делящегося вещества в сборке, представляемого конкретным детектором i) и расчетному числу делений $P_{\text{расч}}^j$ в секции j сборки определяли экспериментальное число делений $P_{\text{эксп}}^j$ в секции j :

$$P_{\text{эксп}}^j = \frac{\sum_i a_i P_{\text{эксп}}^i}{\sum_i a_i P_{\text{расч}}^{(i)}} P_{\text{расч}}^j \quad (2)$$

и полное число делений в сборке $P_{\text{эксп}} = P_{\text{эксп}}^1 + P_{\text{эксп}}^2$. Из отношения $P_{\text{эксп}}$ для каскадной и соответствующей односекционной сборок находили экспериментальное значение коэффициента каскадного усиления A . Расчетные значения коэффициента A находили непосредственно из расчетного полного числа делений в сборках.

Результаты экспериментов и расчетов. Результаты измерения коэффициента умножения нейтронов центрального источника Q во всех 11 модельных сборках представлены в табл. 1. Там же приведены расчетные значения Q , $k_{\text{эф}}$ и число первичных делений в сборках, а также статистические ошибки измеренных значений Q ($P = 0,95$). Статистические ошибки расчетных Q составляют $\sim 0,5\%$, $k_{\text{эф}}$ — $\sim 0,1\%$.

Таблица 1. Результаты измерения и расчета коэффициентов умножения нейтронов центрального источника Q в сборках

Номер модельной сборки	Состав и диаметр слоев сборки, мм*	Расчет		Коэффициент умножения нейтронов центрального источника $Q = III_0$	
		$k_{эф}$	Число первичных делений	Эксперимент	Расчет
1	^{237}Np 34—81,7 + CH_2 82—183 + ^{235}U 183—209,4 + Cd 210—211	0,617	0,364	2,104±0,023	2,22
2	^{237}Np 34—81,7 + ^{235}U 183—229,4 + Cd 230—231	0,651	0,294	2,573±0,019	2,62
3	^{235}U 28—63 + Cd 63—65 + CH_2 82—183 + ^{235}U 183—209,4 + Cd 210—211	0,611	0,353	1,961±0,015	2,01
4	^{235}U 28—63 + ^{235}U 183—229,4 + Cd 230—231	0,601	0,249	2,056±0,014	2,05
5	^{235}U 183—229,4 + Cd 230—231	0,584	0,168	1,624±0,014	1,62
6	CH_2 82—183 + ^{235}U 183—209,4 + Cd 210—211	0,575	0,271	1,515±0,015	1,54
7	^{235}U 28—63 + CH_2 82—183 + ^{235}U 183—209,4 + Cd 210—211	0,703	—	2,641±0,021	2,67
8*	^{237}Np 34—81,7 + ^{235}U 183—209,4 + Cd 210—211	0,522	—	1,874±0,013	1,92
9	^{235}U 183—209,4 + Cd 210—211	0,386	—	1,251±0,010	1,23
10	^{237}Np 34—81,7	0,482	—	1,533±0,018	1,55
11	^{237}Np 34—81,7 + CH_2 82—183	0,496	—	1,047±0,014	1,19

*Между полусферами из нептуния размещены алюминиевые пластины (кассеты для трековых детекторов).

Как видно из табл. 1, получено хорошее согласие измеренных и расчетных значений коэффициента умножения. Этот результат ввиду высокой точности является убедительным свидетельством надежности расчетных данных, в том числе и данных о числе делений в трековых детекторах и секциях.

Некоторые из измеренных в эксперименте распределений плотности делений по радиусу секции модели бланкета показаны на рис. 4—7. Результат выполненной в соответствии с формулой (2) обработки экспериментальных данных представлен в табл. 2. Коэффициенты A , A' приведены с учетом коррекции P_0 , связанной с уравниванием $k_{эф}$ каскадной и соответствующей односекционной сборок ($P_0^{кор} = P_0[(1 - k_{эф}^{односек})/(1 - k_{эф}^{каска})]$). Коэффициенты A соответствуют случаю, когда в качестве односекционной сборки, с которой проводится сравнение, взята модельная сборка 6, A' — сборка 5. В табл. 2 представлены также расчетные $k_{эф}$ сборок, число первичных делений в сборке, погрешности в экспериментальных значениях полного числа делений в сборках и коэффициентов A , A' .

Приведенные в табл. 2 суммарные ошибки измерений P учитывают погрешности табличных данных о сечениях деления нептуния и урана и определения спектра нейтронов в центральном канале реактора БИР-2М, погрешность, обусловленную нестабильностью условий химической обработки поликарбонатных пленок, погрешности аттестации мощности калифорниевых источников и счета треков. В

Таблица 2. Итоговые результаты экспериментальных и расчетных исследований ядерно-физических характеристик двух- и однокаскадных моделей бланкетов

Номер модельной сборки	$k_{эф}$	Число первичных делений	Число делений на 1 нейтрон источника в 1-й, 2-й секциях и в сборке в целом		Коэффициент каскадного усиления с коррекцией на $k_{эф}$ односекционной сборки (в скобках – расчет)	
			Эксперимент	Расчет	A	A'
1	0,617	0,364	$0,344 \pm 0,877 = 1,221 \pm 0,085$	$0,347 \pm 0,953 = 1,300$	$1,71 \pm 0,07 (1,82)$	$2,81 \pm 0,11 (2,94)$
2	0,651	0,294	$0,320 \pm 0,587 = 0,907 \pm 0,065$	$0,346 \pm 0,687 = 1,033$	$1,16 \pm 0,05 (1,32)$	$1,90 \pm 0,10 (2,13)$
3	0,611	0,353	$0,236 \pm 0,784 = 1,020 \pm 0,075$	$0,233 \pm 0,824 = 1,057$	$1,45 \pm 0,08 (1,50)$	$2,38 \pm 0,10 (2,43)$
4	0,601	0,249	$0,172 \pm 0,574 = 0,719 \pm 0,052$	$0,160 \pm 0,513 = 0,673$	$1,05 \pm 0,05 (0,98)$	$1,72 \pm 0,07 (1,59)$
5	0,584	0,168	$0,400 \pm 0,025$	0,407	$0,61 \pm 0,03 (0,62)$	1 (1)
6	0,575	0,271	$0,645 \pm 0,040$	0,643	1 (1)	$1,65 \pm 0,07 (1,61)$

ошибку коэффициентов $A^{\text{эксп}}$ не входят погрешности аттестации источника. Статистическая ошибка в расчетном числе делений в секциях сборок не превышает 0,5%, в числе делений в трековых детекторах — 3—5%. Статистическая ошибка в расчетных $k_{эф}$ сборок, как уже отмечалось, составляет ~0,1%.

Данные табл. 2 свидетельствуют об удовлетворительном согласии экспериментальных и расчетных значений числа делений в сборках и коэффициента каскадного усиления A, A' . Отличие экспериментальных и расчетных значений этих величин, за исключением нескольких случаев, не выходит за пределы суммарных (экспериментальных и расчетных) погрешностей. Из эксперимента следует, что в полном соответствии с данными расчетов и теоретическими представлениями каждая из рассмотренных каскадных сборок характеризуется значительным каскадным усилением числа делений, наиболее высоким каскадным усилением отличается сборка 1 (Np, CH₂, U). Таким образом, можно констатировать, что эксперимент подтвердил теоретические заключения о свойствах каскадных бланкетов и эффективности использования ^{237}Np в качестве средства достижения односторонней связи секций.

В качестве дополнительного комментария к данным табл. 2 следует отметить, что более высокие значения коэффициента A' обусловлены некоторыми сторонними для исследуемых закономерностей факторами. Как показано в статье [17], на значениях коэффициента каскадного усиления существенно сказываются пространственное распределение и замедление нейтронов источника. Замедленный нейтрон источника в случае сборки из высокообогащенного урана имеет большую вероятность вызвать деление в сборке и меньшую вероятность претерпеть утечку. Смещение источника нейтронов от центра в полый сборке также приводит к возрастанию вероятности деления. Сказанное легко подтверждается значениями числа первичных делений в сборках. Большая полость в односекционной сборке 5 приводит к существенному понижению S_0 и P_0 и соответственно к возрастанию коэффициентов A . В односекционной сборке 6 эффект полости нейтрализуется фактором замедления нейтронов источника.

Необходимо отметить, что исследованные в настоящей работе сборки не являются оптимальными для полного проявления преимуществ каскадных бланкетов как по количеству делящихся материалов (и соответственно малому значению $k_{эф}$), так и по конструкции в целом. Расчеты [4, 16, 17] каскадных систем показали, что при увеличении $k_{эф}$ и выборе в качестве замедляющих материалов Be, C, D₂O использование ²³⁷Np в качестве средства создания односторонней нейтронной связи секций обеспечивает получение высоких коэффициентов усиления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов В.Ф., Малинкин А.А. Кинетика двухсекционного бустера-реактора с асимметричной нейтронной связью секций. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, с. 10—23.
2. Колесов В.Ф., Малинкин А.А. Двухкаскадный умножитель нейтронов. Авт. свидет. 786619. — Бюлл. изобретений, 1991, № 30, с. 240 (приоритет от 17.07.1979 г.).
3. Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я. О возможности повышения эффективности электроядерного трансмутационного устройства на базе перехода к многосекционной структуре бланкета. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 71—77.
4. Колесов В.Ф., Штарев С.К., Хоружий В.Х., Житник А.К. Эффективность электроядерного устройства с бланкетом на расплавленных солях и нептуниевой размножающей мишенью. — Там же, 1995, т. 79, вып. 1, с. 40—45.
5. Алексеев П.Н., Игнатьев В.В., Коляскин О.Е. и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности. — Там же, вып. 5, с. 327—337.
6. Герасимов А.С., Киселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт). — Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2001, т. 32, вып. 1, с. 143—188.
7. Барзилов А.П., Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф. и др. Подкритическая реакторная система с каскадным умножением нейтронов. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 1997, № 2, с. 59—66.
8. Воинов А.М., Воинов М.А., Воронцов С.В. и др. Расчетно-теоретическая и конструкторская проработка физического макета двухкаскадного бланкета для электроядерного реактора. — В сб.: Второй научный семинар памяти В.П. Саранцева. Дубна, 23—24 сентября 1997 г. Д9-98-153, 1998, с. 69—76.
9. Griffin P., Miller J., Harms G. e.a. Design trade-off study for a large volume short pulse neutron assembly. — In: Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors. Proc. Intern. Topical Meeting on Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors, Washington, D.C., November 13—17, 1994, p. 292—299.
10. Барашенков В.С., Шелаев И.А. Электроядерные усилители энергии с низкоэнергетическими пучками протонов. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 5, с. 409—411.
11. Бзнуни С.А., Жамкочан В.М., Худавердян А.Г. и др. Каскадные электроядерные системы с жидкокадмиевым вентилем. — Там же, 2003, т. 94, вып. 3, с. 214—220.
12. Эйвери Р., Брениан К., Брансон Дж. и др. Критический эксперимент с энергетическим реактором-размножителем связанного типа на тепловых и быстрых нейтронах. — Труды 2-й Межд. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. Избранные доклады иностранных ученых, т. 3. Физика ядерных реакторов. М., 1959, с. 231—258.
13. Гулевич А.В., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф. и др. Расчет пространственно-временных неоднородностей нейтронного поля при численном моделировании экспериментов на критическом стенде УКС-1М. — В сб.: Труды Межд. конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». 26—29 мая 1992, Обнинск, 1993, т. 2, с. 13—22.
14. Дьяченко П.П., Еловский О.А., Прохоров Ю.А. и др. Реакторно-лазерный комплекс «Стенд Б». — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 5, с. 337—342.
15. Zavialov N.V., Kolesov V.F., Khokhlov Yu.A. On the possibility of experimental testing for the conception of cascade electronuclear facilities using ²³⁷Np. — In: Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy: Second Intern. Workshop, Seyssins, France, April 1998. The American Institute of Physics, 1998, p. 61—66.

16. Колесов В.Ф., Завьялов Н.В., Иванин И.А. и др. Экспериментальное исследование моделей каскадного blankets электроядерного устройства. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 1, с. 42—50.
17. Колесов В.Ф., Хоружий В.Х. Нейтронные характеристики моделей каскадного двухсекционного blankets. — Там же, 2000, т. 88, вып. 5, с. 330—337.
18. Кочубей Ю.К., Житник А.К., Артемьева Е.В. и др. Программа С-95. Моделирование совместно-го переноса нейтронов и γ -квантов методом Монте-Карло. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2000, вып. 2, с. 49—52.
19. Кувшинов М.И., Воронцов С.В., Горелов В.П. и др. Тестовые критические эксперименты на установке ФКБН-2М. — Там же, Сер. Физика ядерных реакторов, 2000, вып. 2—3, с. 142—149.
20. Дюррани С., Балл Р. Твердотельные ядерные детекторы: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 264 с.
21. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. и др. Стандартное поле нейтронов в центре активной зоны БИР-2. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 55—61.

Поступила в Редакцию 2.09.03

УДК 621.039.516.4

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ РЕГЕНЕРАТА УРАНА В ВВЭР

*Проселков В.Н., Алешин С.С., Попов С.Г., Сидоренко В.Д.,
Славягин П.Д., Татауров А.Л. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Милованов О.В., Михеев Е.Н. (ФГУП ВНИИНМ им. А.А. Бочвара),
Ананьев Ю.А. (ФГУП ОКБ «Гидропресс»), Пыткин Ю.Н. (Кольская АЭС),
Пименов Ю.В. (ОАО «Твэл»)*

Длительная эксплуатация и развитие энергетических реакторов предполагают замыкание топливного цикла: возврат плутония и регенерата урана. Возврат в топливный цикл АЭС урана из отработавших ТВС изучали давно. Такой процесс в той или иной мере уже реализуется во многих странах. Сегодня можно говорить о его частичном решении в нашей стране — с начала 80-х годов в РБМК-1000 совместно с топливом из обогащенного ^{235}U природного урана загружаются ТВС, изготовленные из регенерированного топлива. Его особенностью является наличие помимо традиционных ^{235}U и ^{238}U ^{236}U и ^{232}U . Первый изотоп привносит в топливо незначительное дополнительное поглощение нейтронов, второй в процессе радиоактивного распада образует ^{208}Tl , испускающий высокоэнергетическое γ -излучение.

В настоящее время поставлена задача показать принципиальную возможность вовлечения регенерата урана в топливный цикл ВВЭР-440, -1000 и отработать технологию изготовления топливных таблеток обогащением 4% для этих реакторов. К текущему моменту разработаны требования к начальному изотопному составу опытных партий топливных таблеток обогащением 4%, рассчитан коэффициент компенсации, разработаны требования к контролю изотопного состава, определена технология изготовления топливных таблеток из регенерированного топлива.

Изготовление топлива для ВВЭР из регенерированного урана. Опытная партия топлива для ВВЭР-440, -1000 производится по следующей схеме:

изготавливается плав уранил-нитрата с содержанием ^{235}U 2,4—2,5% путем смешивания регенерированного урана из отработавших ТВС ВВЭР-440 (содержание ^{235}U 0,8—1,2%) и среднеобогащенного (содержание ^{235}U 14—17%) регенерированного урана;